

PERPUSTAKAAN UMP



0000067355

ANALISIS KEPATAHAN KE ATAS VERTEBRA LUMBAR TULANG
BELAKANG MENGGUNAKAN KAEDAH UNSUR TERHINGGA
DAN MONTE CARLO

ZULKIFLI BIN AHMAD @ MANAP

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
SARJANA SAINS

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2012

PERPUSTAKAAN UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG		P
No. Perolehan 067355	No. Panggilan TA 409 -785 2012 rs. Thesis	
Tarikh 11 OCT 2012		

ABSTRAK

Tulang belakang lumbar merupakan bahagian badan manusia yang sentiasa digunakan setiap hari. Oleh itu ia menjadi bahagian utama yang menyebabkan patah vertebra seterusnya sakit belakang. Sakit belakang adalah disebabkan kegagalan rangka otot badan dan masalah kesihatan serius. Masalah ini berlaku adalah kerana pekerjaan berat, postur badan statik, kerja berulang, selalu membongkok dan memutar badan, mengangkat barang dan daya mengejut. Tambahan pula, osteoporosis dan patah tulang adalah berkait rapat dan biasanya penekanan diberikan kepada patah tulang vertebra. Penyakit ini disifatkan akibat daripada kehilangan jisim tulang dan meningkatkan risiko vertebra untuk patah. Objektif utama bagi kajian ini adalah untuk membangunkan struktur retak pada model vertebra lumbar dari data proses imej menggunakan permodelan unsur terhingga bersama-sama dengan kaedah Monte Carlo. Secara semulajadi, ketidakpastian memainkan peranan penting dalam memahami kecederaan vertebra pada struktur retak. Metodologi kajian mengandungi permodelan vertebra lumbar, ketidaktentuan dalam persampelan struktur retak, teknik penghasilan jejaring, dan kebarangkalian menggunakan simulasi Monte Carlo. Terdapat dua jenis model yang dibangunkan untuk kajian ini; model penumpuan tegasan (MPT) dan model struktur retak (MSR). Fungsi MPT adalah untuk menyelidik kesan tegasan kritikal yang dikenakan pada model sementara MSR pula adalah untuk simulasi struktur retak menggunakan unsur terhingga dan analisis kebarangkalian. Teknik penjejaringan adalah dihasilkan secara pemetaan pada struktur retak sementara jejaring bebas dengan pertimbangan yang sesuai digunakan untuk keseluruhan badan vertebra. Oleh kerana vertebra adalah bersifat rapuh, kriteria patah adalah berasaskan kepada faktor keamatan tegasan untuk mekanik patah linear elastik (LEFM). Bagi mengendalikan parameter yang melibatkan persampelan struktur retak, analisis kebarangkalian boleh digunakan untuk menilai kegagalan model apabila digabungkan bersama analisis unsur terhingga. Kepelbagaian struktur anatomi dari pembolehubah masukan model diambil kira bagi memodelkan parameter ini sebagai pembolehubah rawak yang menyebabkan kegagalan struktur vertebra seperti geometri, sifat bahan dan beban dengan menggunakan teknik Monte Carlo. Tegasan maksimum berlaku pada kawasan pedikel dengan nilai 2.2 MPa. Keadaan ini menyebabkan kawasan tersebut lemah dan cenderung untuk patah. Sebanyak 100 sampel dicadangkan untuk mendapatkan anggaran titik yang tepat dan hanya 1% sampel gagal disebabkan oleh tegasan kenaan melebihi daripada tegasan alah atau rintangan bahan. Selain itu, faktor keamatan tegasan (SIF) untuk mod bukaan menjadi dominan berbanding mod ricih dan koyakan iaitu dengan $0.52 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Seterusnya, analisis kepekaan mendedahkan yang parameter beban pada badan vertebra dan saiz retak memberi korelasi yang sangat besar dengan parameter keluaran. Kesimpulannya, kajian struktur retak pada pedikel sangat berguna untuk mengkaji fenomena dan sifat patah dalam beban fisiologi.

ANALYSIS OF FRACTURE ON LUMBAR VERTEBRA SPINE USING FINITE ELEMENT AND MONTE CARLO METHODS

ABSTRACT

The lumbar vertebra is a segment of the human spine that is commonly used during daily life. This consequently leads to a vertebral fracture and subsequent a low back pain. Low back pain is a top of musculoskeletal disorder and serious health problem. These problems are due to the heavy work, lifting and sudden forceful incidents. Furthermore, osteoporosis and bone fracture are related and most attention has been given to vertebral fractures. This disease described by loss of bone mass and increased the risk to fracture. The main objective of this work is to develop cracked structure of the lumbar vertebra model from image processing data using finite element modeling associated Monte Carlo methods. In nature, uncertainties play a critical role in understanding the vertebra injury on the cracked structure. The methodology comprises the lumbar vertebra modeling, uncertainties of cracked structure sampling, generate meshing technique, and probabilistic using Monte Carlo simulation. There are two types of model have been developed for this study; model for stress concentration (MPT), and model for crack structure (MSR). The function of MPT is to investigate the effect of critical stress subjected to the model whereas MSR is to simulate the cracked structure using finite element and probabilistic analysis. Meshing technique is generated as mapped mesh for cracked structure while a free mesh with suitable consideration to the whole body of vertebra. Since the vertebra is a brittle material, fracture criterions are based upon on the stress intensity factor for linear elastic fracture mechanics (LEFM). In order to operating the uncertainties of cracked structures sampling parameter, probabilistic analysis can be used to evaluate the probability of failure model when associated with the finite element analysis. Anatomical parameter of the model input variables is accounted by modeling these parameters as random variables caused a failure in vertebra structure are geometry, material properties and loading using Monte Carlo technique. The maximum stress was observed on the pedicle region with 2.2 MPa. This condition is weakening that area and tends to be fracture. There are 100 samples were recommended to obtain reasonable accurate point estimates and only 1% will be fail due to the applied stress exceeds the yield stress or material resistance. On the other hand, stress intensity factor (SIF) of opening mode become the most dominant compared to the shearing and tearing modes with $0.52 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. In addition, sensitivity analysis was revealed that the force applied to the vertebral body and crack size parameters give a huge correlation with output response. In conclusion, the crack structure study on pedicle is useful to investigate the fracture characteristics phenomena in physiological loading.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	ix
SENARAI RAJAH	x
SENARAI SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Kepentingan Kajian dan Penyataan Masalah	3
1.3 Objektif Kajian	6
1.4 Skop Kajian	6
1.5 Bentangan Tesis	8
BAB II KAJIAN PERPUSTAKAAN	
2.1 Pengenalan	9
2.2 Anatomi Tulang Belakang Manusia	9
2.2.1 Anatomi kolum spina	10
2.2.2 Anatomi vertebra	11
2.2.3 Struktur tulang vertebra	13
2.2.4 Gerakan fisiologi	14
2.3 Sakit Belakang	16
2.4 Analisis Biomekanik Dengan Unsur Terhingga (FEA)	17
2.4.1 Fungsi FEA	17
2.4.2 Model vertebra dan analisis biomekanik	18
2.5 Kepatahan Tulang	21
2.5.1 Jenis kepatahan tulang	21
2.5.2 Kriteria mekanik patah	23
2.5.3 Jenis mod pembebanan	24
2.5.4 Mekanisma retak	25

2.6	Analisis Kebarangkalian	26
2.6.1	Ketaktentuan	27
2.6.2	Analisis ketentuan	28
2.6.3	Kaedah monte carlo	29
2.6.4	Taburan rawak	32
2.6.5	Fungsi prestasi kegagalan	32
2.6.6	Analisis kepekaan	33
2.7	Kaji Selidik Bilangan Kertas Kajian	34
2.8	Penutup	36

BAB III KAEDAH KAJIAN

3.1	Pengenalan	37
3.2	Carta Alir Pemodelan	38
3.3	Pemodelan Vertebra Lumbar	39
3.3.1	Pembinaan model penumpuan tegasan (MPT)	40
3.3.2	Pembinaan model struktur retak (MSR)	42
3.4	Pemodelan Analisis Undur Terhingga	45
3.4.1	Pemilihan sifat bahan	46
3.4.2	Pemilihan jenis elemen	47
3.4.3	Pemilihan ketumpatan jejaring	48
3.4.4	Keadaan sempadan	50
3.5	Pemodelan Mekanik Patah	51
3.5.1	Mekanik patah linear elastik (LEFM)	52
3.5.2	Faktor keamatan tegasan (SIF)	52
3.5.3	Struktur retak semi bulatan	55
3.5.4	Hubungan antara nilai K dan G	55
3.6	Analisis Kebarangkalian	57
3.6.1	Ketaktentuan di dalam simulasi monte carlo	57
3.6.2	Penentuan pemboleh ubah rawak	59
3.6.3	Penentuan nilai purata, sisihan piawai dan pekali ubahan	60
3.6.4	Penjanaan nombor rawak, u_i	63
3.6.5	Kemaskini maklumat kebarangkalian	69
3.7	Penutup	74

BAB IV KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pengenalan	76
4.2	Simulasi Model Terhadap Beban Mampatan	77
4.3	Simulasi Kebarangkalian Terhadap Beban Mampatan	81
4.4	Simulasi Model Struktur Retak	90

4.5	Simulasi Kebarangkalian Permukaan Retak	98
4.6	Penutup	106

BAB V KESIMPULAN DAN CADANGAN KERJA MASA HADAPAN

5.1	Kesimpulan	108
5.2	Analisis Unsur Terhingga	108
5.3	Analisis Kebarangkalian	109
5.4	Cadangan	110

RUJUKAN

LAMPIRAN

A	Senarai Nilai Masukan
B	Senarai Penerbitan
C	Arah Rujukan Anatomi

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
3.1	Kombinasi jenis elemen untuk jejaring bebas dan jejaring aturan	48
3.2	Nombor rawak, u_i , yang telah dijana secara seragam di antara 0 dan 1	64
3.3	Taburan normal bagi beban kenaan pada badan vertebra	65
3.4	Data untuk pemboleh ubah rawak	74
4.1	Sifat bahan bagi simulasi terhadap MPT	77
4.2	Sifat bahan untuk pemboleh ubah rawak terlibat.	81
4.3	Nilai pemboleh ubah rawak yang dikenalpasti bagi 10 sampel	84
4.4	Maklumat persampelan data pemboleh ubah rawak	84
4.5	Korelasi aturan peringkat Spearman	88
4.6	Nilai keliatan patah dari penyelidik lain mengikut jenis tulang.	92
4.7	Sifat bahan dan parameter yang terlibat bagi simulasi ini	93
4.8	Faktor keamanan tegasan MSR untuk lima kontur dan tiga sudut berbeza	95
4.9	Pemboleh ubah yang digunakan dalam tesis ini untuk analisis kebarangkalian	100
4.10	Penjanaan pemboleh ubah rawak F_{FCT} dan F_{BDY} dengan taburan normal	101
4.11	Kebarangkalian kegagalan untuk empat pemboleh ubah keluaran	105

SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
1.1	Anatomi tulang belakang manusia	2
1.2	Kedudukan saraf tunjang dilingkungi bahagian posterior	4
1.3	Bahagian lumbar tulang belakang	7
2.1	Anatomi kolum spina	11
2.2	Anatomi tulang vertebra lumbar	12
2.3	Perbandingan saiz badan vertebra	12
2.4	Struktur kortikal dan kanselus	13
2.5	Gerakan asas fisiologi	15
2.6	Julat sudut gerakan maksimum	15
2.7	Bentuk elemen tetrahedral 10 nod	20
2.8	Perbezaan faktor yang mempengaruhi kegagalan	22
2.9	Jenis mod pembebanan pada struktur retak	24
2.10	(a) retak kecil yang berlaku dan (b) retak sekitar osteon	25
2.11	Parameter $X1$ dan $X2$ yang bertindih	30
2.12	Bilangan jurnal dari sumber scopus dan science direct	35
3.1	Carta alir pemodelan kebarangkalian bagi mekanik patah	38
3.2	Imej 3D rangka badan manusia	40
3.3	Imej vertebra lumbar L2	41
3.4	Sepuluh model permukaan vertebra	41
3.5	Model vertebra yang dipadukan	42
3.6	Geometri vertebra bagi model (a) terkini (b) (Shirazy-Adl, 1991)	42
3.7	Kepatahan unilateral pada vertebra	43
3.8	(a) struktur retak lengkap (b) struktur retak belakang	43
3.9	Jejaring (a) struktur retak lengkap (b) struktur retak belakang	45
3.10	Struktur retak digabungkan bersama MPT	45
3.11	Jenis elemen bagi SOLID186	47
3.12	Model tulang yang dianalisis dengan ketumpatan berbeza	49
3.13	Graf jumlah elemen dengan tegasan	49
3.14	Keadaan sempadan bagi daya mampatan	50
3.15	Elemen tunggal hujung retak permukaan	53

3.16	Bentuk badan retak umum	54
3.17	Pembinaan retak semi bulatan	55
3.18	Aturan kerja bagi analisis kebarangkalian	58
3.19	Proses penjanaan pemboleh ubah rawak	64
3.20	Graf taburan LHS bagi pemboleh ubah X_1 dan X_2	66
3.21	(a) Fungsi ketumpatan kebarangkalian dan (b) Fungsi taburan kumulatif bagi taburan normal	68
3.22	(a) Fungsi ketumpatan kebarangkalian dan (b) Fungsi taburan kumulatif bagi taburan lognormal	69
3.23	Taburan kebarangkalian kegagalan	72
3.24	Hubungan pemboleh ubah rawak monotonik	73
4.1	Penumpuan tegasan pada MPT	78
4.2	Taburan tegasan mengikut nisbah agihan beban	78
4.3	Graf tegasan maksimum melawan nisbah agihan	79
4.4	Perbandingan keputusan antara (a) terkini (b)(Nabhani & Wake,2002)	79
4.5	Imej Resonan Magnetik (MRI) bagi vertebra L4	80
4.6	Arahan yang digunakan di dalam perisian ANSYS	82
4.7	Fungsi ketumpatan kebarangkalian dan fungsi taburan kumulatif bagi parameter yang terlibat.	83
4.8	Taburan pemboleh ubah rawak bagi parameter pilihan	85
4.9	Kebarangkalian kegagalan vertebra	86
4.10	Analisis kepekaan parameter	88
4.11	Pandangan dari arah paksi MRI patah mampatan pada L3	90
4.12	Nilai faktor keamanan tegasan kritikal untuk jenis tulang berbeza	92
4.13	Penamaan simbol untuk retak permukaan	93
4.14	Tegasan Von Mises pada MSR.	94
4.15	Kontur bagi nod 131 yang diambil sebagai contoh	94
4.16	Faktor keamanan tegasan bagi tiga nod penilaian	97
4.17	SIF melawan saiz retak	98
4.18	Hubungan antara Modulus Young dengan ketumpatan vertebra	99
4.19	Fungsi ketumpatan kebarangkalian dan fungsi taburan kumulatif	102
4.20	Pemboleh ubah rawak bagi parameter pilihan	103
4.21	Kebarangkalian kegagalan untuk tegasan maksimum dan mod retak	105

SENARAI SIMBOL

a	Jejari retak
A_b	Luas badan vertebra
A_f	Luas sendi faset
B	Tebal model
c	Lebar retak
$COV(X)$	Pekali ubahan pembolehubah rawak
d	Perbezaan pangkat
E	Modulus Young
$E(X), \mu_x$	Purata pemboleh ubah rawak
$f_x(x)$	Fungsi ketumpatan kebarangkalian
F	Faktor pembetulan
F_{BDY}	Beban pada badan vertebra
F_{FCT}	Beban pada sendi faset
$F_X(x)$	Fungsi taburan kumulatif
$g(X)$	Fungsi prestasi rawak
G	Kadar pembebasan tenaga terikan
G_C	Kadar pembebasan tenaga terikan kritikal
i	Nisbah agihan
J	Kamiran- J
k	Pekali kekenyalan
K_{eqv}	Faktor keamatan tegasan setara
K_I	Faktor keamatan tegasan Mod I

K_{II}	Faktor keamanan tegasan Mod II
K_{III}	Faktor keamanan tegasan Mod III
K_C	Faktor keamanan tegasan kritikal
n	Bilangan data
N	Jumlah keseluruhan sampel
N_f	Bilangan sampel gagal
p	Peringkat kebarangkalian spesifik
P	Beban tekanan keseluruhan
P_f	Kebarangkalian kegagalan
P_s	Kebarangkalian kejayaan
$R(X)$	Gerak balas rawak
$S(X)$	Kekuatan bahan rawak
S	Beban kenaan
S_μ	Ukuran perubahan purata
S_σ	Ukuran perubahan sisihan piawai
T	Tebal struktur retak
u_i	Nombor rawak maya
$\text{Var}(X)$	Varian pemboleh ubah rawak
W	Lebar struktur retak / Lebar model
X	Pemboleh ubah rawak
Y	Alah bahan
$Z(X)$	Pemboleh ubah kegagalan rawak

α	Faktor kepekaan kebarangkalian
β	Indeks keselamatan
ε	Terikan
ν	Nisbah Poisson
μ	Modulus ricih
σ	Tegasan
σ_x	Sisihan piawai
σ_{ij}	Tegasan pada arah i dan j
σ_m	Tegasan maksimum
ρ	Pekali hubungan Spearman
θ_x	Pekali kepencongan
$\Phi()$	Fungsi piawai taburan normal
s_i	Variat normal piawai
γ_{xy}	Terikan ricih
τ_{xy}	Tegasan ricih
ξ_x	Purata dalam bentuk lognormal
δ_x	Sisihan piawai dalam bentuk lognormal
∂	Operator terbitan separa

BAB I

PENDAHULUAN

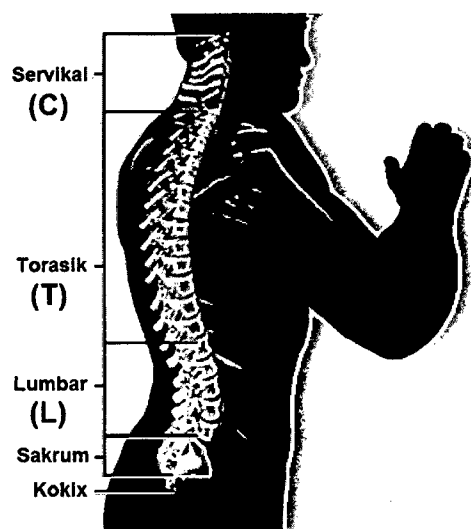
1.1 PENGENALAN

Kepatahan tulang merupakan fenomena kompleks yang menyebabkan kegagalan berlaku akibat daripada beban kenaan melampau dan kecacatan pada struktur tulang. Kecacatan di sini merujuk kepada retak yang terhasil pada tulang sebelum ianya merambat. Apabila retak wujud pada tulang, tegasan akan menumpu pada hujung retak dan patah jenis ini dikenali sebagai patah tegasan. Hujung retak yang mengalami tegasan tinggi menjadi kawasan kritikal untuk kegagalan tulang berlaku. Keadaan ini tidak dapat digambarkan dengan menggunakan teori keanjalan tetapi melalui prinsip mekanik patah. Mekanik patah menjadi penilaian kepada analisis kepatahan tulang untuk kajian ini. Kepatahan tulang boleh berlaku disebabkan oleh beban kenaan yang melampau akibat daripada kesan hentaman seperti jatuh atau perlanggaran. Beban kenaan melampau ini, bukan sahaja menyebabkan berlakunya patah tulang bahkan boleh membawa kepada kematian terutamanya kepada pesakit yang berumur kerana kekuatan tulang semakin lemah.

Mekanik patah adalah satu bidang yang mengkaji kelakuan mekanik retak di bawah pembebanan luaran. Pembebanan retak tulang dibahagikan kepada tiga jenis mod berdasarkan arah beban dan arah retak. Mod I adalah keadaan pembebanan pada mod bukaan, manakala Mod II ialah mod geseran dalam satah, dan Mod III ialah mod ricih antisatah. Tulang merupakan struktur biologi yang tidak simetri, maka pembebanan berlaku untuk tiga jenis mod tersebut. Retak akan merambat apabila pembebanan melebihi rintangan bahan dan boleh ditentukan melalui faktor keamatan tegasan kritikal.

Sakit belakang merupakan gejala penyakit di dalam kategori kegagalan fungsi rangka otot badan. Sekurang-kurangnya 75%-85% daripada orang dewasa akan mengalami sekurang-kurangnya sekali pengalaman sakit belakang di sepanjang hidupnya dan daripada itu 50%-70% adalah sakit pada bawah tulang belakang (LBP) (Amundson 2010). Faktor-faktor ini adalah disebabkan kerja berat secara fizikal, postur kerja yang statik, sentiasa berpusing dan membengkokkan badan, mengangkat barang yang berat, kemalangan secara mendadak, kerja berterusan yang berulang, dan pendedahan pada getaran. Bahagian lumbar menjadi bahagian kritikal untuk sakit LBP berlaku.

Rajah 1.1 menunjukkan anatomi tulang belakang manusia mengikut segmen. Terdapat tiga bahagian utama iaitu servikal (bahagian atas), torasik (bahagian tengah) dan lumbar (bahagian bawah). Terdapat lagi dua bahagian kecil di bawah lumbar iaitu sakrum dan kokix. Setiap bahagian tulang tersebut tersusun secara menegak yang dikenali sebagai vertebra dan pembahagiannya adalah tujuh vertebra untuk servikal, dua belas vertebra untuk torasik, dan lima vertebra untuk lumbar. Ahli perubatan melabelkan setiap vertebra dengan simbol bagi memudahkan pengenalan. Perlabelan mengikut bahagian dan susunan vertebra dari superior ke inferior. Servikal, torasik dan lumbar dilabelkan masing-masing dengan huruf *C*, *T*, dan *L*. Sebagai contoh, vertebra dalam bahagian servikal dengan kedudukan 2 dari superior dilabelkan sebagai C2 manakala vertebra lumbar ketiga pula dengan label L3.



Rajah 1.1 Anatomi tulang belakang manusia
Sumber: www.spine-health.com

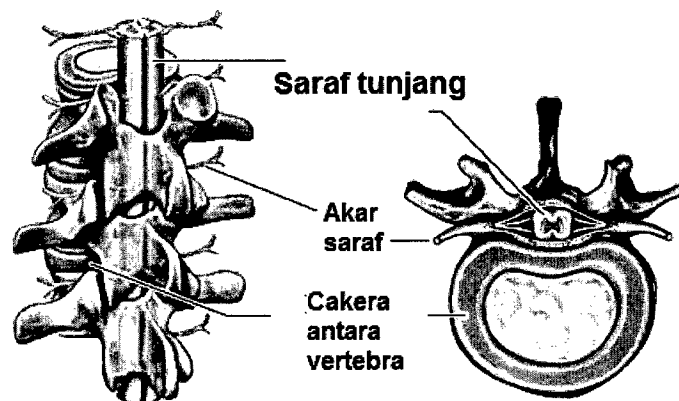
Kajian tentang tulang belakang biasa dilakukan menggunakan kaedah simulasi unsur terhingga (Dreischarf et al. 2012; Fice & Cronin 2012; Niemeyer et al. 2012). Kaedah ini memerlukan data masukan sebagai asas kepada analisis dan data masukan tersebut yang biasa digunakan oleh penyelidik adalah dalam bentuk tunggal dan malar. Kaedah simulasi tradisi sebegini dinamakan sebagai kaedah ketentuan. Dalam keadaan realiti, pengukuran secara ketentuan berulang kali memberi keputusan pengukuran yang berbeza-beza. Di antara keputusan tersebut, terdapat keputusan yang mempunyai nilai kekerapan yang tinggi berbanding dengan yang lain. Fenomena yang berlaku ini menghasilkan keputusan yang berbeza malah tiada corak taburan yang khusus. Ia dikenali sebagai istilah ketaktentuan.

Dua data keluaran yang diambil kira di dalam penilaian kegagalan tulang adalah nilai alah dan patah bahan. Penilaian ini ditentukan melalui tegasan alah bahan dan keliatan patah kritikal tulang. Kaedah kebarangkalian diperkenalkan bagi merungkai masalah yang berkaitan dengan perihai suatu analisis ketaktentuan. Ini disebabkan pemboleh ubah rawak bukan sahaja melibatkan data masukan malah data keluaran analisis unsur terhingga. Sebagai contoh, pengukuran modulus elastik tulang seorang individu memberi nilai yang berbeza apabila diukur berulang kali. Begitu juga dengan faktor alah dan patah tulang yang merupakan data keluaran rawak bagi analisis unsur terhingga dan berbeza untuk setiap individu. Ketaktentuan ini berlaku atas sebab beberapa faktor iaitu umur, bentuk badan, pekerjaan, cara hidup, dan pemakanan. Oleh kerana itu, kegagalan struktur tulang yang berlaku pada seseorang individu tidak akan sama dengan individu lain.

1.2 KEPENTINGAN KAJIAN DAN PENYATAAN MASALAH

Tulang belakang merupakan sistem rangka badan utama yang berfungsi sebagai menampung berat badan dan melindungi saraf tunjang. Pada keadaan berdiri dan berjalan, beban yang bertindak kepada tulang belakang merujuk kepada berat badan sahaja. Berat badan yang ditanggung pula mewakili berat atas badan iaitu berat dari bahagian pinggang ke atas. Pemindahan berat tersebut pula adalah melalui vertebra yang membentuk tulang belakang. Keadaan ini tidak termasuk beban luar jangkaan seperti jatuh dan pelanggaran yang menyebabkan beban yang bertindak melebihi

daripada beban biasa yang dapat ditanggung oleh tulang belakang. Selain daripada itu, tulang belakang menjadi pelindung kepada organ dalaman dan saraf tunjang. Saraf tunjang merupakan saraf terpenting yang menyambungkan otak dengan anggota badan untuk kawalan pergerakan. Perlindungan ini dapat dilihat daripada bentuk anatomi vertebra seperti pada Rajah 1.2. Bahagian posterior vertebra adalah melengkung dan mengelilingi saraf tunjang bagi mengelakkan berlakunya kecederaan pada bahagian tersebut. Akan tetapi, sebarang kepatahan yang berlaku pada bahagian ini memberi kesan langsung kepada saraf tunjang. Oleh yang demikian, kajian berkenaan dengan tulang belakang terutamanya bahagian posterior vertebra ini membawa signifikansi yang besar kepada manusia.



Rajah 1.2 Kedudukan saraf tunjang dilingkungi bahagian posterior
Sumber: Green 2010

Kewujudan retak kecil adalah dikenali normal pada tulang manusia dan haiwan secara semulajadi (Hazenberget al. 2006). Biasanya, retak sering berlaku kepada mereka yang mempunyai ketumpatan jisim tulang yang rendah terutamanya kepada orang tua dan wanita menopause serta dikaitkan dengan penyakit osteoporosis. Kepatahan tulang yang terhasil dari retak ini dikenali secara klinikal sebagai patah tegasan. Kajian yang dijalankan oleh Bow (2012) mendapati bahawa kadar insiden kepatahan vertebra di China adalah 194/100,000 orang setiap tahun bagi lelaki dan 508/100,000 orang bagi wanita. Sementara itu, Susan (2008) pula mendapati 491/2700 orang mengalami kepatahan ini melalui pemerhatian selama 15 tahun di US. Begitu juga di Malaysia pada tahun 2007 melalui Yayasan Arthritis Malaysia menganggarkan seramai satu juta penduduk berisiko mengalami osteoporosis dan 20% daripadanya adalah lelaki. Maka dengan itu, kebarangkalian pesakit yang mengalami kepatahan vertebra adalah tinggi.

Seterusnya, kajian ini menjadi sebagai kaedah baru dalam menjangka kegagalan tulang. Gabungan kaedah unsur terhingga dan kebarangkalian membolehkan kajian yang dilakukan ini lebih realistik dan bermakna kerana dapat membantu pakar kesihatan dalam membuat keputusan mendiagnosis pesakit. Model tiga dimensi (3D) yang dibangunkan ini lebih merujuk kepada vertebra sebenar dengan mengambil kira tiga jenis pembebanan mod retak. Analisis juga mengambil kira ketaktentuan yang wujud di dalam struktur biologi yang tidak dapat diselesaikan menggunakan analisis ketentuan.

Masalah yang sering berlaku berpunca dari tulang belakang adalah sakit pada bahagian belakang (LBP). Ia boleh berlaku akibat daripada cakera membengkak, cakera tergelincir, lubang saraf sempit, dan kepatahan vertebra. Kepatahan mampatan vertebra pula adalah biasa berlaku terutamanya pada bahagian lumbar berpunca daripada retak. Keadaan ini adalah sangat bahaya kerana kepatahan boleh berlaku bila-bila masa bergantung kepada saiz retak itu sendiri. Oleh itu, penilaian saiz retak dengan keamatan tegasan pada hujung retak menjadikan kajian ini perlu dilaksanakan.

Sistem biologi manusia mempunyai pelbagai ketaktentuan yang tidak dapat ditentukan melalui andaian dan pengalaman pakar sahaja. Ini kerana pemboleh ubah dan parameter yang terlibat adalah dalam bentuk kuantiti rawak dengan jenis taburan statistik sama ada normal atau lognormal. Analisis secara ketentuan menjadi pilihan penyelidik untuk menentukan kegagalan tulang kerana biasanya data masukan yang digunakan adalah dalam bentuk tunggal dan ini memudahkan lagi analisis. Akan tetapi, kaedah ketentuan tidak dapat menggambarkan keadaan sebenar kegagalan tulang kerana keputusan yang terhasil adalah berbeza untuk setiap individu atau sampel. Ketaktentuan juga melibatkan parameter masukan dan parameter keluaran analisis secara serentak. Oleh itu, fenomena ini secara pastinya tidak dapat diselesaikan dengan kaedah ketentuan.

Pemboleh ubah rawak yang dihasilkan mempunyai nilai maksimum dan minimum, namun ianya tidak dapat dianggap sebagai satu nilai malar seperti nilai purata. Ini adalah kerana, nilai purata tersebut mungkin memberi penilaian yang lebih

tinggi atau mungkin lebih rendah dari nilai sebenar yang kita tidak ketahui. Oleh yang demikian, kaedah kebarangkalian dapat menyelesaikan masalah ketaktentuan yang wujud dalam menentukan kegagalan sebenar sistem yang dianalisis. Setiap pembolehubah rawak tersebut akan diterangkan secara lebih terperinci dalam bab III tesis ini.

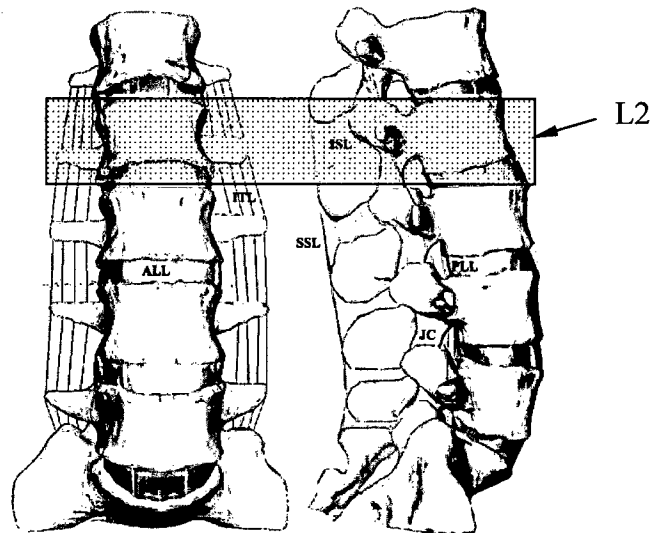
1.3 OBJEKTIF KAJIAN

Secara keseluruhannya, objektif kajian adalah seperti berikut:

1. Membangunkan model vertebra lumbar dari data proses imej dengan menggunakan perisian rekabentuk.
2. Menganalisis penumpuan tegasan dan faktor keamanan tegasan retak tulang pada vertebra lumbar dengan menggunakan kaedah unsur terhingga.
3. Membangunkan program kebarangkalian Monte carlo yang digabungkan bersama kaedah unsur terhingga dengan memodelkan ketaktentuan pada vertebra lumbar.

1.4 SKOP KAJIAN

Sakit belakang (LBP) selalunya berlaku di bahagian lumbar L2 seperti Rajah 1.3. Ini kerana bahagian ini bertindak sebagai pivot ataupun engsel bagi menampung beban statik ataupun dinamik. Selain daripada itu, lumbar menjadi kawasan yang sering digunakan di dalam aktiviti harian. Kebanyakan masalah tulang belakang berlaku pada bahagian ini dan sangat diberi perhatian oleh penyelidik. Oleh itu, analisis penumpuan tegasan dan mekanik patah memberi penekanan pada vertebra L2 kerana kepatahan sering berlaku pada segmen tersebut.



Rajah 1.3 Bahagian lumbar tulang belakang
Sumber: Moramarco et al. 2010

Bagi memudahkan pemodelan dilakukan, beberapa andaian pada struktur vertebra telah ditentukan pada geometri dan sifat bahan vertebra. Dari segi geometri, vertebra adalah dianggap berbentuk simetri dan mempunyai retak unilateral iaitu retak pada sebelah bahagian pedikel sahaja seperti Rajah 3.7. Bentuk retak pula adalah berbentuk semi bulatan sebagai mengganti bentuk semi elips kerana saiz retak yang kecil tidak memberi kesan yang besar terhadap keputusan yang diperoleh. Selain daripada itu, bentuk semi bulatan lebih mudah untuk dibina serta memudahkan analisis. Walaupun vertebra mempunyai sifat bahan berbeza pada bahagian anterior dan posteriornya, akan tetapi banyak anggapan dari penyelidik lain mengatakan yang vertebra terdiri daripada satu bahan sahaja. Oleh yang demikian, sifat bahan vertebra dianggap sebagai bahan isotropik, homogen dan linear.

Faktor keamatan tegasan menjadi kriteria dalam penentuan kepatahan tulang. Pemodelan struktur retak di dalam kajian ini tertumpu kepada permulaan retak sahaja dan tidak melibatkan proses perambatan retak yang lebih kompleks. Oleh itu, analisis kepatahan hanya tertumpu pada mekanik patah linear elastik (LEFM). Analisis kebarangkalian pula memfokuskan kepada jenis taburan statistik normal dan lognormal untuk parameter geometri, sifat bahan dan beban kenaan. Sebanyak 100 sampel digunakan sebagai jumlah bilangan percubaan MCS. Semakin banyak percubaan yang dilakukan, semakin tinggi tahap ketepatan kebarangkalian yang

diperolehi dan 100 sampel ini dianggap mencukupi untuk digunakan di dalam kajian ini dan pengkaji terdahulu seperti Niemeyer et al. (2012).

1.5 BENTANGAN TESIS

Secara umumnya tesis ini dibahagikan kepada lima Bab. Setiap bab akan membincangkan secara terperinci kajian yang dijalankan ini. Ringkasan bagi setiap bab ini akan dijelaskan mengikut turutan berikut.

Bab II memaparkan kajian berkaitan dengan anatomi tulang belakang yang berkaitan dari segi geometri, kriteria mekanikal serta fungsinya, sorotan kajian dari penyelidik terdahulu mengenai analisis unsur terhingga pada vertebra, teori mekanik patah dan analisis kebarangkalian.

Bab III membincangkan tentang pembangunan dua model lumbar tulang belakang daripada data proses imej serta anggapan yang digunakan seperti sifat bahan, geometri, nilai beban, dan simetri. Mekanik patah linear elastik (LEFM) digunakan melalui pendekatan faktor keamatan tegasan. Penggabungan kaedah di antara analisis unsur terhingga (FEA) dan simulasi Monte Carlo (MCS) telah dijalankan bersama untuk analisis kebarangkalian. Seterusnya, persamaan-persamaan yang berkaitan dari kajian penyelidik-penyelidik terdahulu dipersembahkan.

Bab IV mempersembahkan keputusan pemodelan yang diperolehi daripada analisis ketentuan dan analisis kebarangkalian. Perbandingan keputusan pemodelan yang dijalankan oleh penyelidik lain juga ditunjukkan dalam bab ini berserta dengan perbincangan mengenai keputusan yang diperolehi dengan huraian lebih mendalam.

Bab V pula mengandungi kesimpulan keseluruhan kajian dan beberapa cadangan untuk kajian lanjutan pada masa akan datang.

BAB II

KAJIAN PERPUSTAKAAN

2.1 PENGENALAN

Dalam Bab II ini, maklumat berkenaan dengan asas anatomi vertebra dan tulang belakang dibincangkan secara ringkas. Penerangan adalah merangkumi kolum spina, vertebra lumbar, ciri-ciri tulang vertebra, dan asas gerakan fisiologi. Seterusnya, dibentangkan mengenai sakit belakang yang dialami oleh pesakit khususnya pada bahagian lumbar. Pada bahagian analisis biomekanik pula menerangkan bagaimana penyelidik memodelkan tulang vertebra dengan penetapan beberapa parameter seperti sifat bahan, jenis elemen, jejaring dan beban kenaan. Kemudian disusuli dengan kepatahan tulang yang disebabkan oleh retak melalui kriteria mekanik patah linear elastik. Analisis yang penting dalam penentuan kegagalan tulang adalah analisis kebarangkalian kerana ianya melibatkan ketaktentuan yang wujud pada sistem. Akhir sekali, Bab II ini ditutup dengan kaji selidik tentang bilangan kajian yang dilakukan oleh penyelidik lain berdasarkan sumber Science direct dan Scopus.

2.2 ANATOMI TULANG BELAKANG MANUSIA

Pemahaman mengenai anatomi tulang belakang adalah penting sebelum memodelkannya pada Bab III tesis ini. Oleh itu, pada bahagian ini akan menerangkan tentang struktur yang membentuk anatomi tulang belakang bermula dengan kolum spina, jenis-jenis vertebra, ciri-ciri vertebra dan gerakan fisiologi vertebra.

2.2.1 Anatomi Kolum Spina

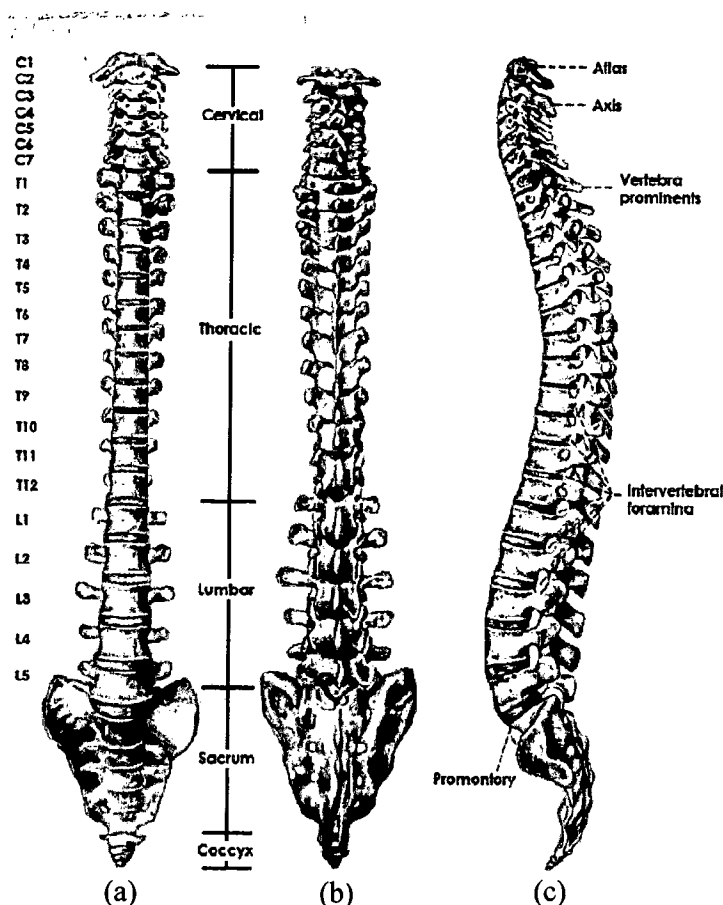
Kolum spina ataupun kolum tulang belakang merupakan satu struktur mekanikal yang kompleks dalam badan (Kuo et al. 2010; Meyer et al. 2004; Morais et al. 2010; Nabhani&Wake 2002; Schmidt et al. 2007; Su et al. 2009). Ia boleh diumpamakan sebagai rod elastik terubahsuai yang memainkan peranan yang penting di dalam postur tegak dan kestabilan badan. Fungsi utamanya adalah untuk melindungi saraf tunjang (Kurtz et al. 2006; Mathison et al. 2008) daripada tercedera dan trauma, memindahkan beban dari kepala dan leher kepada pelvis, dan membenarkan fleksibiliti serta pembengkokan leher dan badan. Ia juga bertanggungjawab dalam menyediakan perlindungan kepada saraf-saraf lain serta mengekalkan kestabilan postur badan (Jonathan 2009).

Tulang belakang yang normal adalah melengkung seperti bentuk *S* untuk penyerakan berat badan dan memberi ruangan kepada organ-organ lain. Tulang belakang terdiri daripada gabungan susunan ruas tulang individu dikenali sebagai vertebra dan disambung dengan ligamen pasif dan otot aktif yang mengekangnya. Vertebra terpisah antara satu sama lain oleh cakera elastik dan sendi faset yang disokong dengan otot aktif bagi membolehkan gerakan dinamik tiga satah berlaku. Cakera berfungsi sebagai penyerap hentakan, penyerakan daya-daya, pemindahan tekanan dari satu vertebra ke vertebra lain, dan memudahkan badan untuk melengkung dan berpusing secara semulajadi (Sigamani 2007).

Rajah 2.1 menunjukkan satu kolum spina yang lengkap dengan label pengklasifikasiannya. Tulang belakang adalah struktur yang bersendi dan bersegmen, terdiri daripada 33 vertebra dan lima bahagian yang tersusun di dalam satu kolum spina. Bagi memudahkan doktor mengenalpasti setiap satu vertebra tersebut maka proses perlabelan digunakan. Label ini hanya digunakan untuk tiga bahagian utama gerakan dalam kolum spina iaitu servikal, torasik dan lumbar sahaja.

Label *C* mewakili kepada bahagian servikal, *T* untuk bahagian torasik dan *L* untuk bahagian lumbar. Terdapat sebanyak 24 vertebra untuk 3 bahagian utama ini, 7 vertebra servikal, 12 vertebra torasik, dan 5 vertebra lumbar. Perlabelan vertebra

adalah dari superior hingga ke inferior, maka label vertebra adalah seperti Rajah 2.1(a). Selebihnya, bahagian sakrum dan kokix dengan 5 dan 4 vertebra masing-masing bersambung dengan tulang punggung. Kedua-dua bahagian ini dipanggil sebagai ekor tulang kerana bentuknya seperti ekor seperti Rajah 2.1(c). Oleh kerana segmen tulang ini tidak mempunyai cakera, maka bentuknya kekal tetap tanpa lenturan.

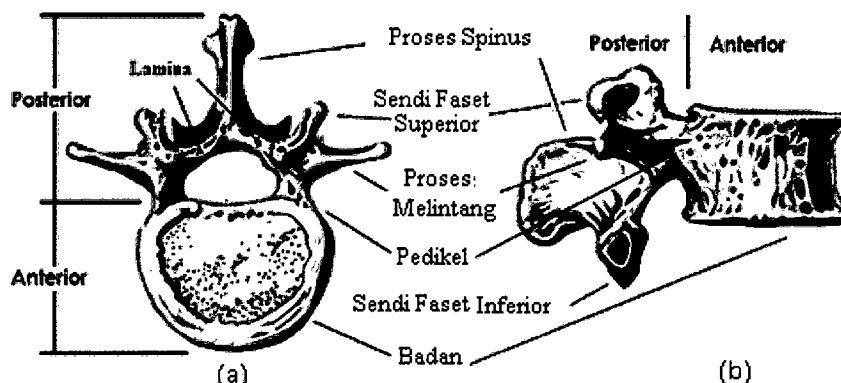


Rajah 2.1 Anatomi kolum spina
Sumber: Clemente 2010

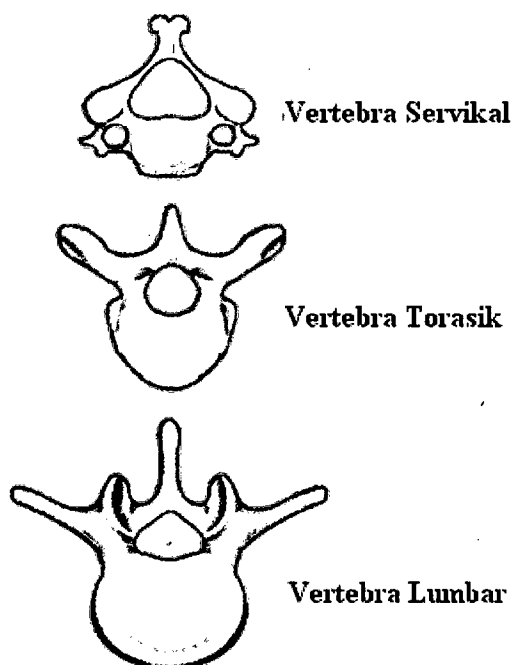
2.2.2 Anatomi Vertebra

Merujuk kepada Rajah 2.2, vertebra terdiri daripada dua bahagian elemen: badan vertebra pada elemen anterior manakala gelang bertulang pada elemen posterior. Gelang bertulang juga dipanggil sebagai lengkung neural yang terdiri daripada satu proses spina yang unjur ke belakang, empat sendi faset (superior dan inferior), dua proses melintang ke sisi, dua lamina, dan dua pedikel. Sendi faset membenarkan gerakan yang terhad antara segmen bagi menghalang gerakan melampau merosakkan

saraf tunjang. Pengunjuran daripada setiap pedikel ke hadapan dari garisan tengah adalah plat kecil tulang dikenali sebagai lamina. Lamina dari setiap bahagian bertemu dan bersambung antara satu sama lain pada garisan tengah proses spina. Sepasang pedikel menyambungkan bahagian badan vertebra dengan gelang bertetulang pada bahagian. Kawasan terbuka pedikel, lamina dan badan vertebra membentuk rongga segitiga yang dikenali sebagai vertebral foramen ataupun lubang spina iaitu kawasan saraf tunjang. Penyakit spina stenosis adalah akibat daripada penyempitan lubang spina ini.



Rajah 2.2 Anatomi tulang vertebra lumbar
Sumber: Moses 2011



Rajah 2.3 Perbandingan saiz badan vertebra
Sumber: Sheffield 2012